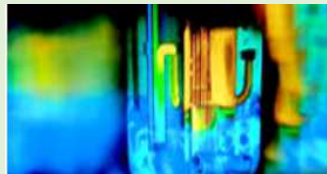


RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ET RÉSEAUX D'ÉNERGIE

ANALYSE SYSTÈME

Paluel 4x1300MW



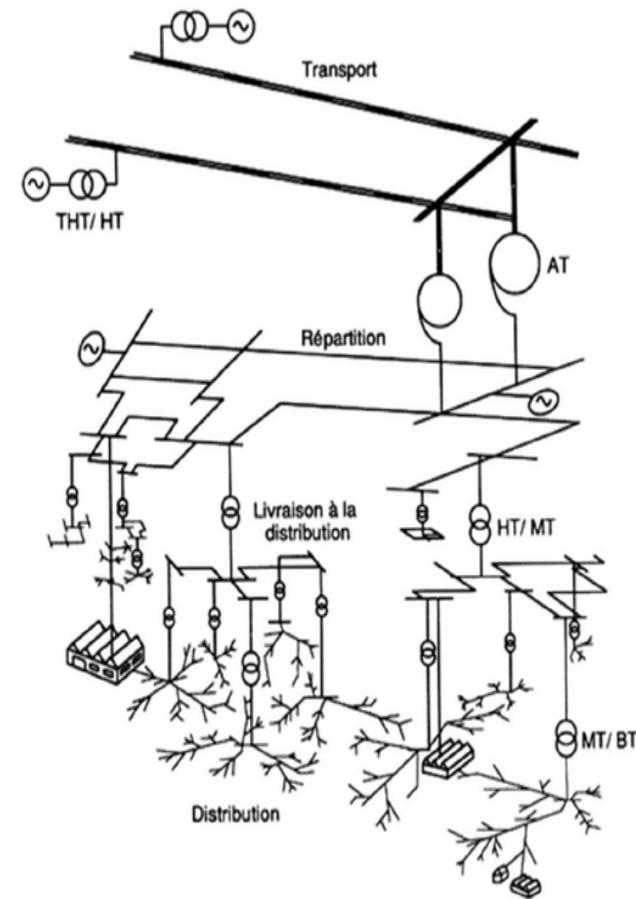
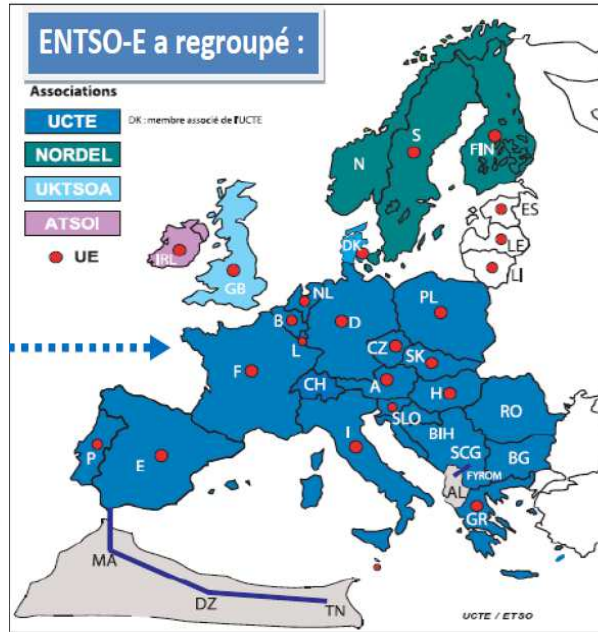
Cad 12MW + 4 Stockage



HYDRO 21 7 DÉCEMBRE 2018

David Fraboulet

Le Réseau Electrique



- Grand transport THT 400-225kV
- Répartition Régionale HT 225 90 63 kV
- Distribution étoilée HTA 20 15kV
- Basse Tension 400V tri, 230V Mono
- Historiquement : Co-développement avec les moyens de production
- Des lignes, des postes, un pilotage, une anticipation.

AT autotransformateur
BT basse tension
HT haute tension
MT moyenne tension
THT très haute tension



Equilibre Statique Réseau (spatio-temporel)

Production = Consumption

Nouveaux paradigmes ?

- Auto-consumption, auto production ?
- Stockage d'énergie ?
- Effacement et reports de consommation ?
- Importation/exportations ?
- Nouvelles règles de marché ?
- Smart grid ? ,...

$$\text{Prod.} + \text{Import} - \text{Eff}_{\text{prod}} + \text{Destockage} = \text{Cons} + \text{Export} - \text{Eff}_{\text{cons}} + \text{Stockage}$$

En "tout point",
A tout instant,
A toute échelle,
Pour tout "business model",
....

+ **Equilibre dynamique**
(notion de service réseau)



Éléments techniques clés

- Angle d'analyse : les « **flexibilités** » : de production, de consommation.
 - Echelles de **temps** :
 - milliseconde, seconde,
 - minutes, heure, semaine, mois
 - Investissements multi-décennaux
 - Echelles **spatiales**
 - Installation individuelle => échelle continentale,
 - réalité des acheminements et « Plaque de cuivre »
 - « tous les MWh n'ont pas la même valeur d'usage ».
 - Analyses de **cycle de vie complet** indispensable.
-

Technologies de production électrique pilotée

- **1- Centrales thermiques à flamme**

- Cycle Ouvert : Flexibilité : 20%/Minute, rendement 40%
- Cycles combinés : **Flexibilité 8-10%/Minute, rendement 60%**

Rq France < 70 gCO₂/kWh, Allemagne > 400gCO₂/kWh

⇒ Capture Séquestration ?

⇒ Bio-carburants ? (voir plus loin)



- **2- Centrales nucléaires**

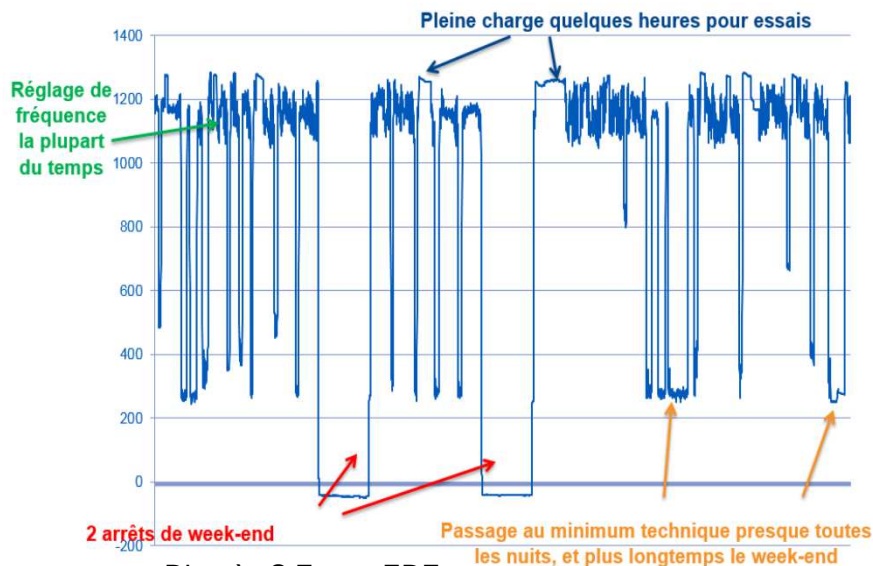
- Standard **5% PN/minute**
- Compte tenu des puissance installées : 1^{er} gisement de flexibilité en France



Pilotabilité nucléaire (en France)

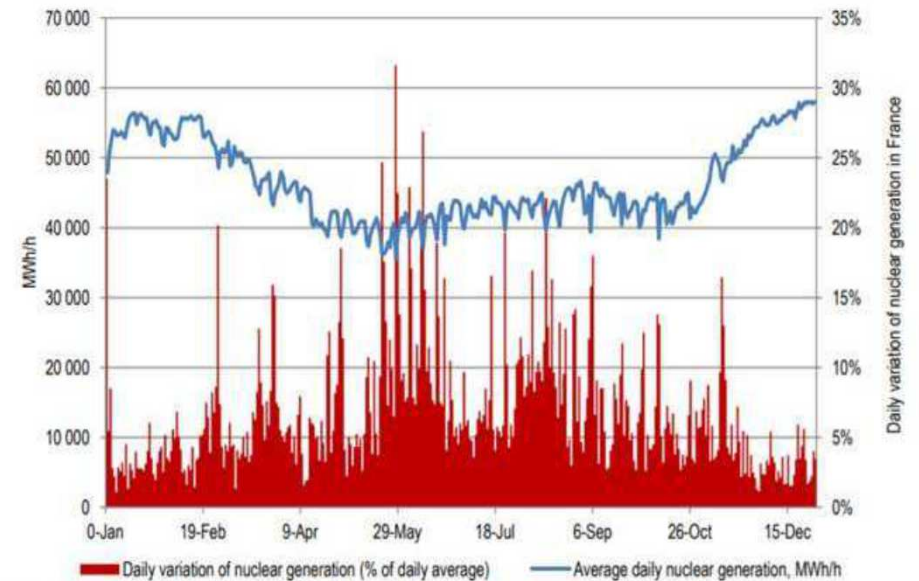
Par pilotage du réacteur (de 100 à 20%)

Production – Golfech 2 – Juin 2013 – KU 65 %



D'après S Feutry EDF.

Par pilotage du parc (58 réacteurs en 19 sites)



Source: RTE - Réseau de transport d'électricité (France).

- Besoin indispensable dès la conception du parc pour s'adapter à la consommation variable.
- Capacités de flexibilité suffisent aux besoins actuels : quid si réduction Parc Nuke et accroissement EnRs ?
- **Taux de charge et compétitivité ?** Contraintes techniques ? Vieillessement ?



Autres productions pilotables

• Hydraulique

- « STEP » = **Stockage 0,1 TWh.**
- **Total Stockage Hydro 3.5TWh** (Lacs principalement...), renouvelé 3-4 fois par an, selon conditions climatiques (=17TWh production lacs annuelle)
(pour mémoire électricité **consommée** en France= **1-2 TWh/jour**).
- Eclusé : Total 3.5TWh ?
- Fil de l'eau (peu pilotable).



Grand'Maison 1800MW

• Biomasse ?

- Besoin impératif de cycle de vie complet
(Bilan CO₂ et environnemental)
 - Analyse de **ressource (précieuse et limitée)**
 - Actuelle 9 Mtep Bois + 2.6Mtep carburants transformés
 - Ultime 20 Mtep ?? (Pour mémoire Transport 50Mtep)
- ⇒ **Choix délicat des usages**
- ⇒ Carburants biosynthétiques (avec apport énergétique externe)



Croisements de vecteurs : Electrique/gaz/chaaleur



Gaz

Stockage Canalisations 5-10TWh ?

Stockages supplémentaires réservoirs 130TWh ?

Linéaires transport **10x moins chers**

Dépendance 98%
CO2 ?

Gaz synthétiques?
Bio-synthétiques ?

Privilégier usages finaux chaaleur et rééquilibrage P=C (l'hiver)



EnRi : Solaire Photovoltaïque



- **Hier** produire un maximum d'Énergie
- **Aujourd'hui** : vente sur marchés
 - => prédiction de production
- **Demain** : participer à l'équilibre et à la qualité des réseaux :
 - Optimisation de la répartition spatiale et temporelle des installations
 - Centrales pilotables : convertisseurs EP.
 - Emulation d'inertie, injection de réactif
 - Contrôle de qualité des harmoniques (du 50Hz)
 - Vieillesse des convertisseurs
 - (durée de vie 7-10 ans, moitié de celle des panneaux)

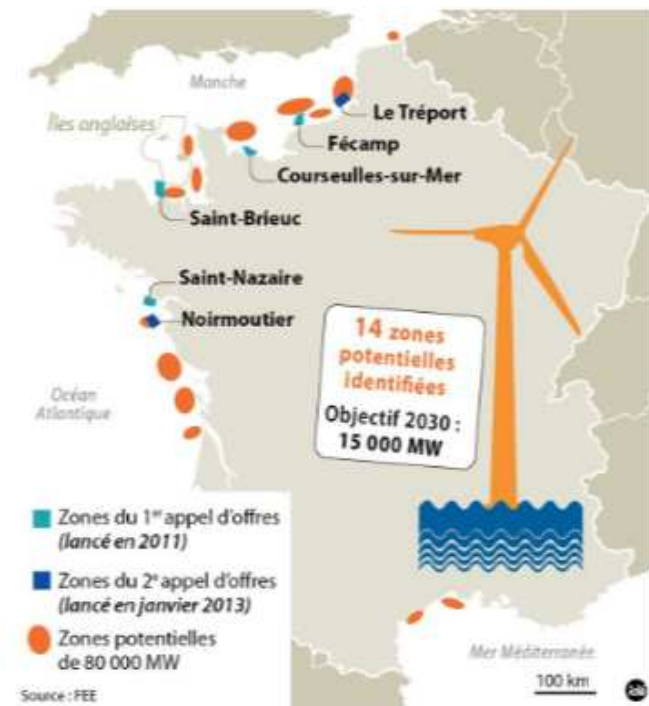


EnRi : Eolien

- systématiquement redressement puis ré-ondulation du courant produit =>

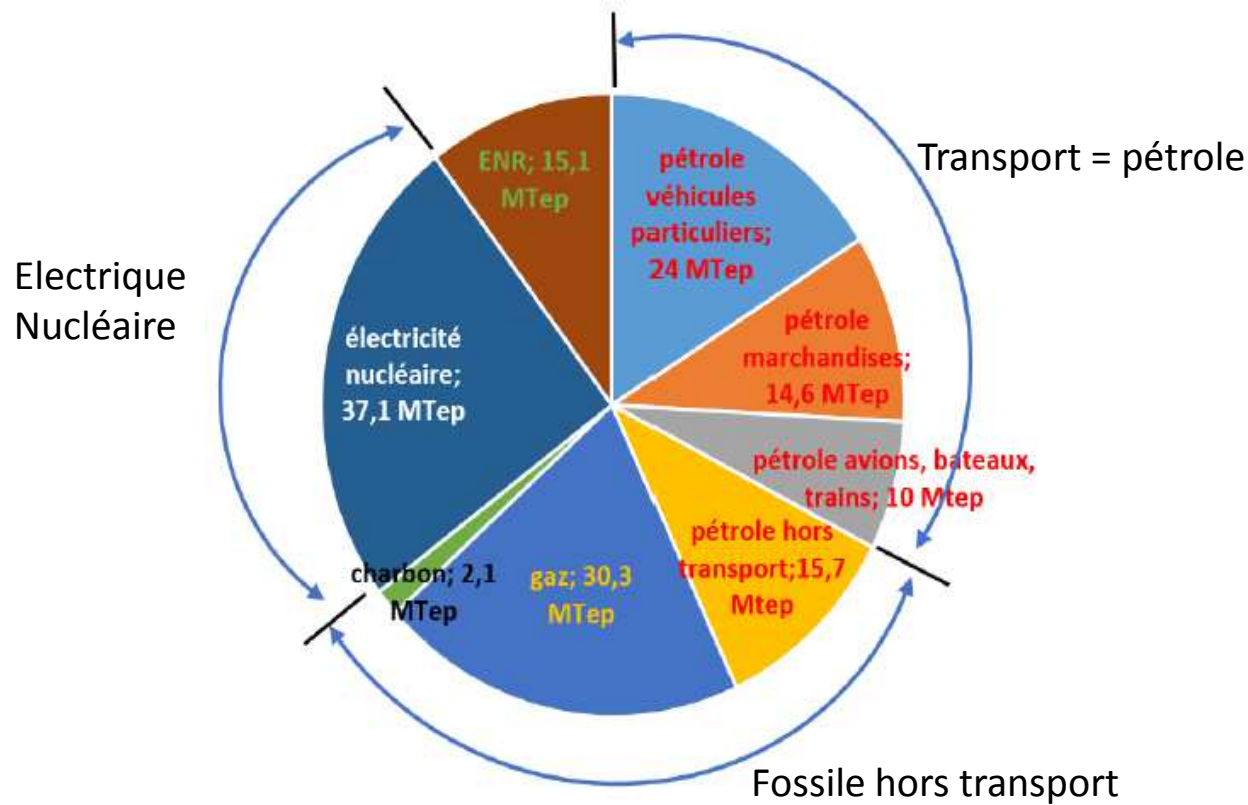
Problématiques techniques voisines du PV sur
Electronique de puissance

- Intermittence d'une nature différente (à étudier en détail) de celle du PV :
 - Moins saisonnier, moins quotidien
 - Moins prédictible, moins régulier
 - **Foisonnement à étudier de près.**

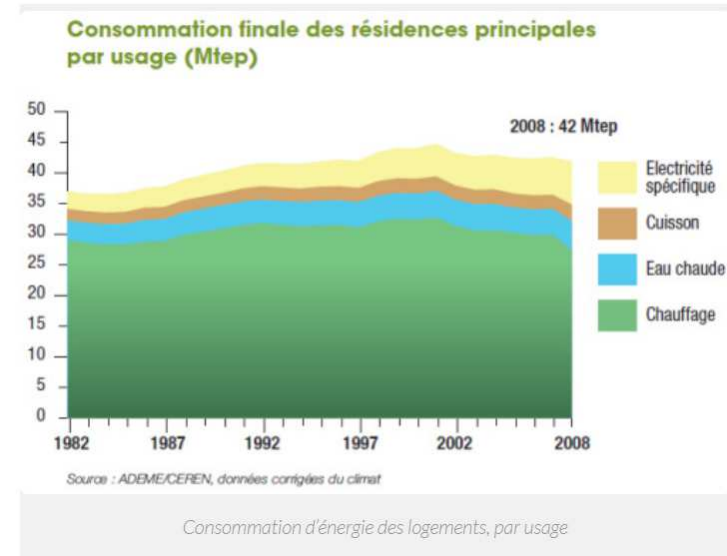




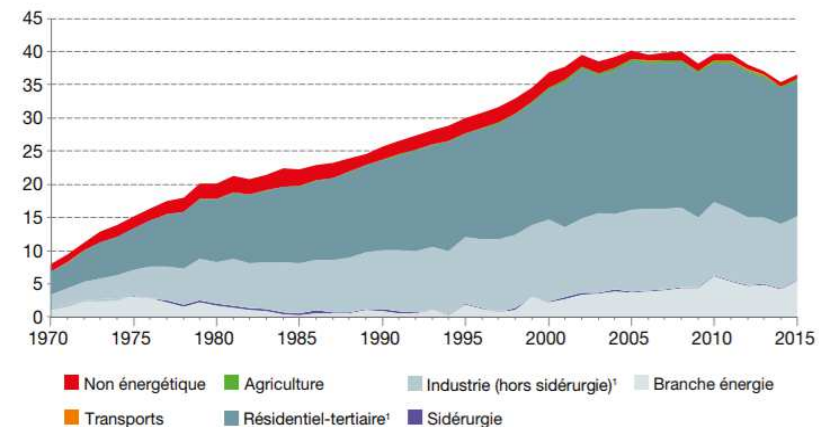
Consommation d'Énergie en France



- 2/3 : d'origine fossile.
- Pétrole majoritairement pour transport (50MTep, stable depuis 20 ans)
- Gaz principalement pour chauffage et eau chaude (tertiaire et habitat).



CONSOMMATION PRIMAIRE¹ DE GAZ NATUREL PAR SECTEUR : 473,9 TWh EN 2015
En Mtep PCI²



¹ Consommation corrigée des variations climatiques.

² 1 TWh PCS = 1 milliard de kWh en pouvoir calorifique supérieur (définitions p. 67).
Champ : métropole.

Sources : SOeS, enquête annuelle sur la statistique gazière ; Fédération française de l'acier

Leviers de flexibilité coté Consommation ?

• Transport

- Parc VP TOTALEMENT Electrifié : $20\text{kWh} \times 30^{\text{e}6} = 0.6 \text{ TWh}$ de stockage.
- Débat entre véhicules tous électriques et PHEV
- Opportunité des « routes électriques »
- Gestion d'usage et impact sur les réseaux énergétiques : contrainte et opportunité.

• Résidentiel et tertiaire

- Dynamique plus lente,
- Grandes Marges d'efficacité (pompes à chaleur)
- Opportunité de stockage (thermique) et d'effacement

• Industriel

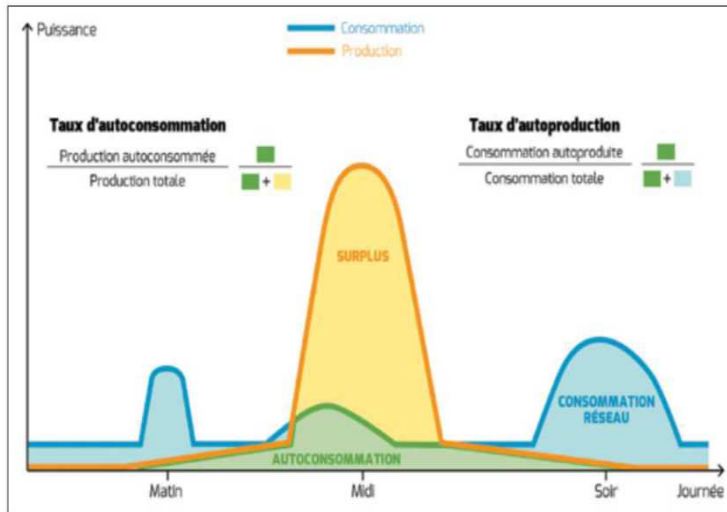
- Usage chaleur (280TWh/an) et couplage de vecteurs. Réseaux de chaleur ?
- Effacement : potentiel significatif (5GW selon RTE) mais à évaluer finement



<200°C

>550

Consommateurs-producteurs



- Déconnexion du réseau : ultra marginal.
- **Autoconsommation** : phénomène émergent (20 000 foyers en 2017, selon ENEDIS)
 - Selon RTE: 6-10GW en 2030 ? 3xPlus ??
 - Pour 17^e6 maisons individuelles PV+Batterie qq kWh => 25-50TWh annuel.
- Phénomène de « grande consommation »

Aucune vision système => Nécessité d'anticiper de manière centralisée



Approche Systémique et outils de modélisation

- **Multi-échelles spatiales et temporelles**, plusieurs outils nécessaires et Plateforme d'articulation
 - Outils **quasi-statiques** : de la minute à la décennie
 - Régime **dynamique** : inertie, fréquence, tension, synchronisme,
=> Nouveaux développements mathématiques ?
- But : prédire complètement les trajectoires énergétiques et leurs **conséquences techniques**.
- Métriques et Paramètres : choix à laisser libres
 - Intégrer fonctionnement d'ensemble du système
 - Trajectoires d'évolution
 - Consommations d'intrants, impacts, **eco-bilans, e ROI**, ...
=> Outils d'aide à la décision
- Clé : **Accès aux données**



Conclusion générale

- Poser le plus clairement possible les termes de réflexion
 - Urgence à la prise de recul
 - Vérifier que les directions suggérées sont conformes aux objectifs

 - Manoeuvrabilité accrue du nucléaire ?
 - Changement des échelles d'équilibre ? (vers le local ?)

 - Besoins de back up ?
 - => **Role important de l'hydraulique**

 - Faisabilité du stockage ?
 - => **Role ESSENTIEL de l'hydraulique.**

 - => **Exigence d'analyse systémique** + Cycles de vie complets

 - Penser international et déclinaison industrielle
-



Annexes et compléments

Situation Énergétique Mondiale en 2015

La situation énergétique de la France est à comparer à la situation mondiale, dominée à plus de 80% par les énergies fossiles (voir **figure A-1**).

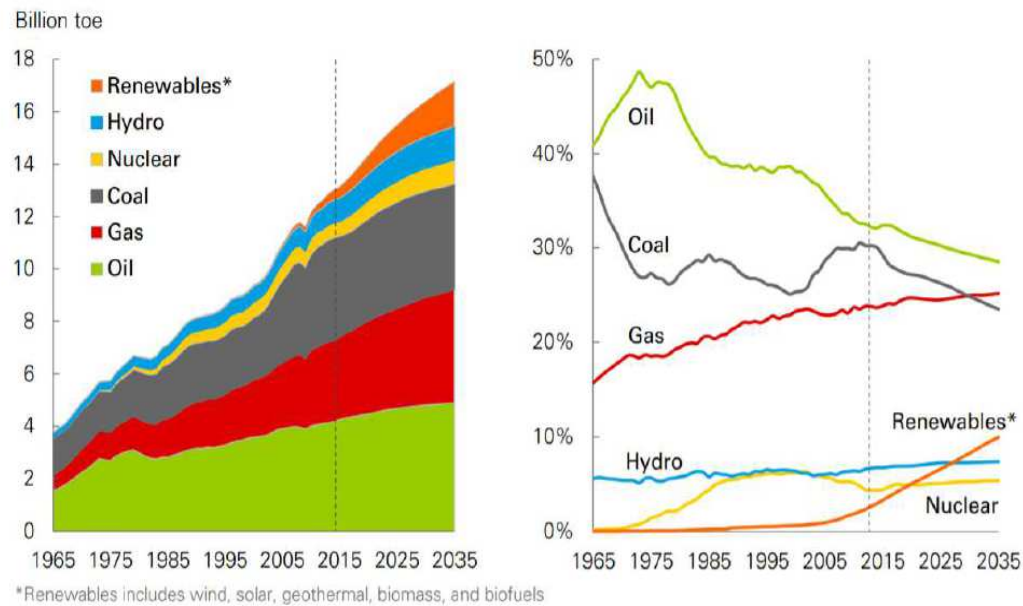
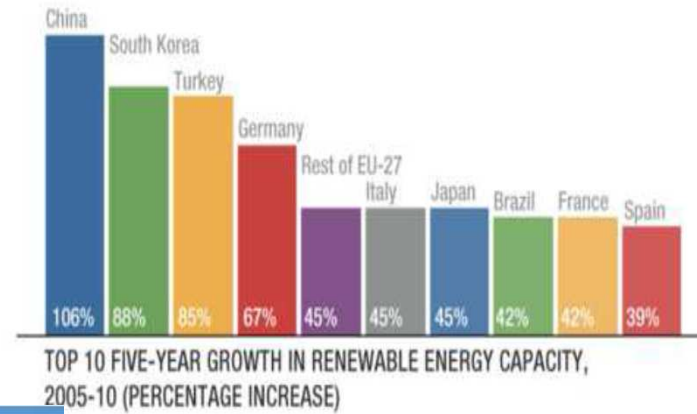
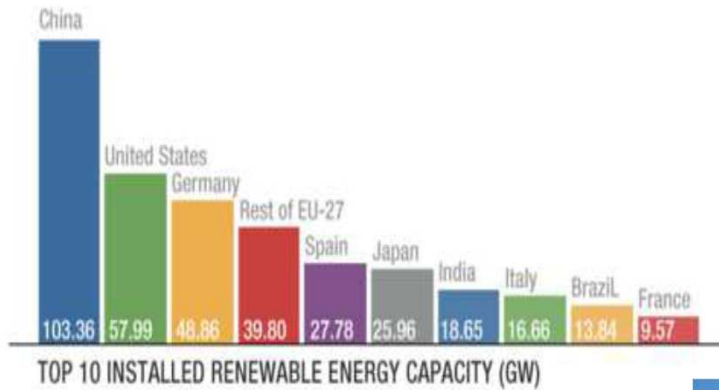


Figure A-1 : Trajectoire Énergétique Mondiale de 1965 à 2015 et extrapolation à 2035, d'après BP Energy Outlook 2017. A l'échelle mondiale les énergies fossiles représentent une large majorité de la ressource énergétique. L'ensemble des énergies décarbonées (Hydraulique, nucléaire et renouvelables) reste une part inférieure à 20% en 2015.

Energie dans le monde: une révolution ?

The Clean Energy Race?



Saint Herblain FR 7,2 MW 2018 ?



2016 France :
Typical : 3kWc
10-12k€
Energy return : 2,5y



Walney UK 367 => 660 MW 2018

Records de prix du PV : il se passe quelque chose ?

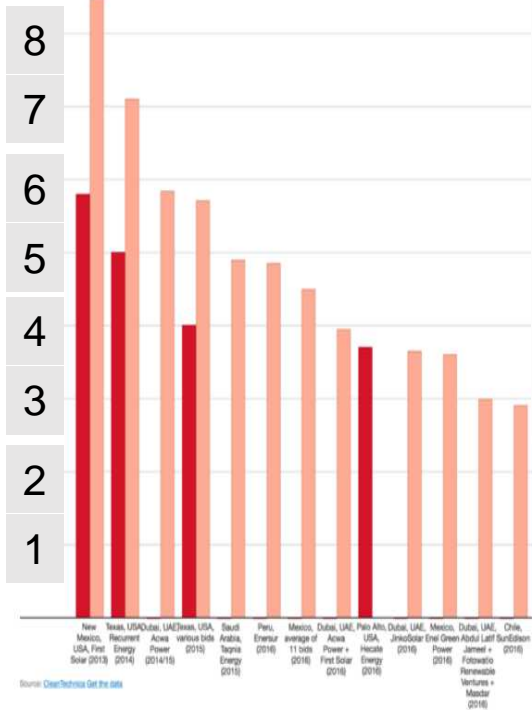
World's cheapest prices submitted for Saudi Arabia's first solar project
Oct. 2017 : 1.79 cts/kWh

Aug. 2016 :
New Low Solar Price Record
Set In Chile — 2.91¢ Per kWh!

Low Solar Bids (2013-2016)

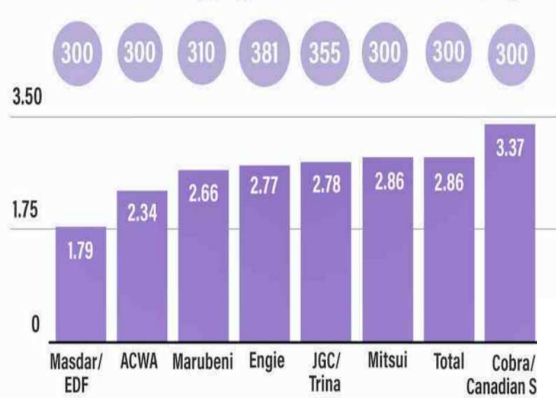
Prices agreed to under 20- and 25-year power purchase agreements. Note that the low bids in Texas are actually lower than the amounts represented in the chart... have not been revealed.

■ Subsidized Price (¢ per kWh) ■ Unsubsidized Price (¢ per kWh)



Bids for Saudi Arabia's Sakaka Solar Plant

Levelised cost of electricity (US\$)



France 2016 : 40-50€/MWh (1€/Wc)
Cout de la production seulement...

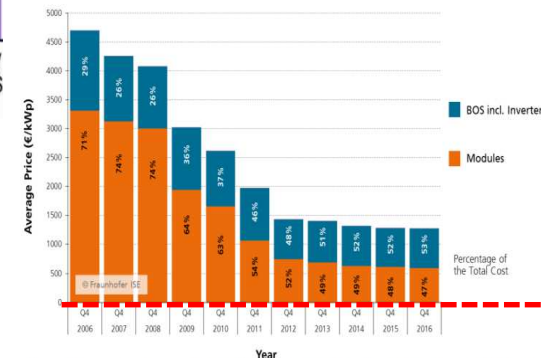
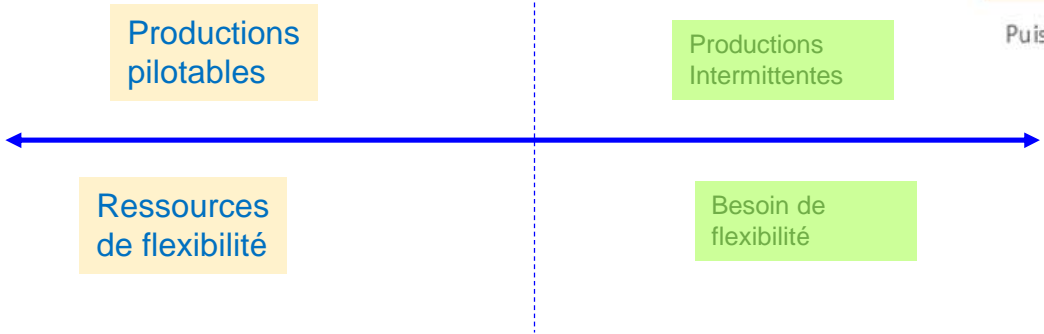
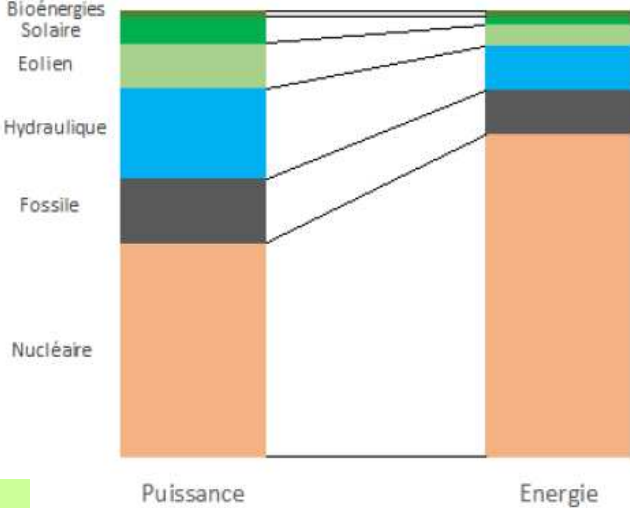


Figure 3: Average end customer price (net system price) for installed rooftop systems with rated nominal power from 10 - 100 kWp, data from BSW, plotted by PSE AG.

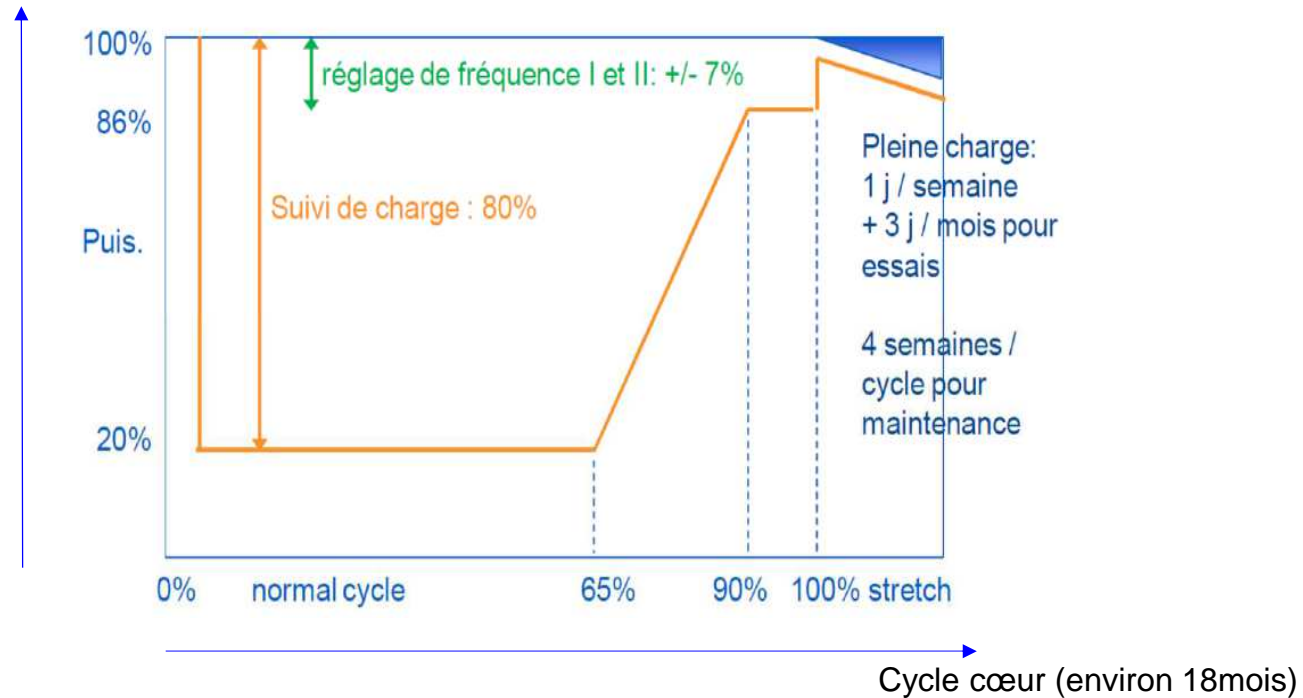
A- Production d'Énergie en France

	Fossile	Nucléaire	Hydra- ulique	EnR (Eolien, Solaire, Biomasse)
Puissance installée	14%	48%	20%	18% (10%, 6%, <2%)
Énergie produite/an	10%	72% (au plus bas depuis 1992)	10%	8% (4.5%, <2%, <2%)



B- Pilotabilité nucléaire et cycle combustible

Profondeur
réduction de
charge
Autorisée
(sans arrêt
cœur)

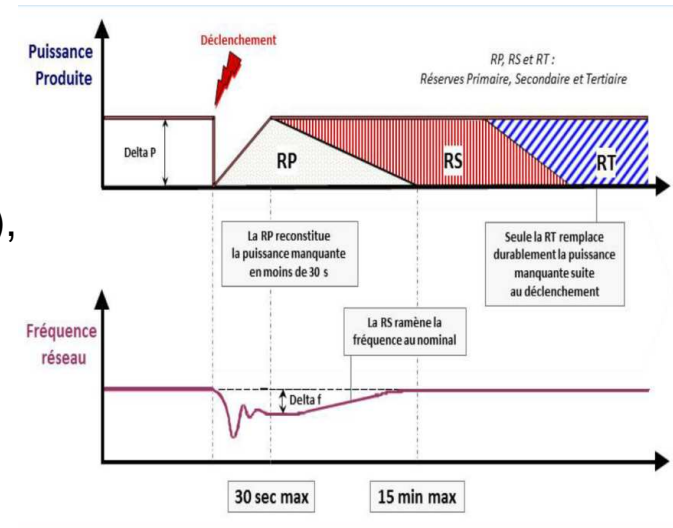


- Palier Prolongé à basse puissance + remontée rapide => risque de « déconditionnement » de la gaine (« crédits Interaction Pastille Gaine ou crédits K »)
- FPPI (>8h à <92%PMD) : plafond réglementaire 30 jours.

=> **Besoin de compréhension accrue des limites physiques, marges d'amélioration combustible.**

D- Challenges techniques actuels sur le réseau

- RTE : équilibre statique
 - Primaire +/-2.5% en 30s (>15 min),
 - Secondaire +/- 4.5% (5% /min variation),
 - Tertiaire ...
- Plan tension.
- Gestion des congestions en courant
- Maitrise des puissances réactives.



Stabilité Dynamique (< min), synchronisation de phase :

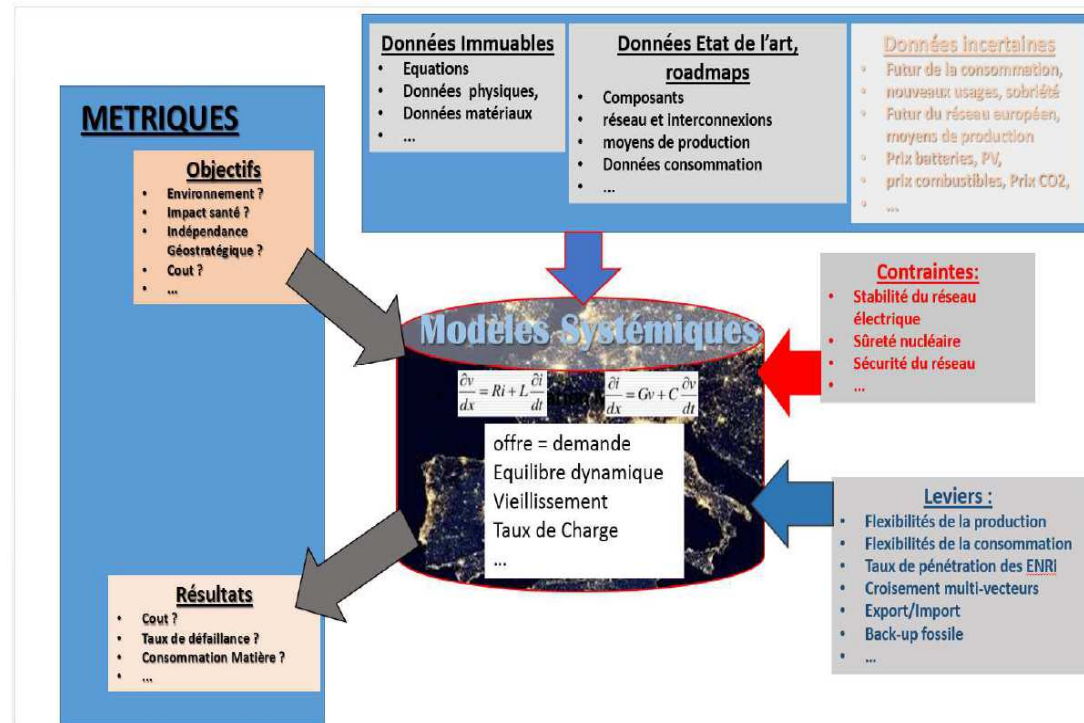
- Systemes Inductifs, machines tournantes => pilotage en EP, ...
- => inertie synthétique.
- Filtrage harmoniques



D- Challenges techniques futurs sur le réseau

- **Contrôle dynamique** des infrastructures
Exemple « dynamic line rating »
 - Structure du réseau : Réseaux reconfigurables, “auto-cicatrisants”, nouvelles architectures.
 - Ré-introduction de réseaux **continus** ?? (Tesla Versus Edison !!)
 - HVDC
 - Réseau local 100V DC ??
 - **Plans de protection**, gestion de défaillance
 - Black start, “grid forming”
 - Nouveaux canaux de contrôle (voie numérique ?)
 - Cyber-sécurité
-

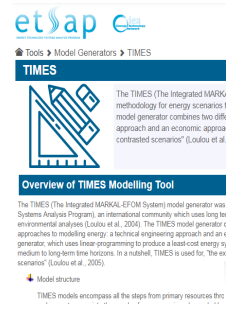
G- Métriques et paramètres



- **Expliciter et ne pas figer les hypothèses d'entrée**
- **Travailler sur variables statistiques**



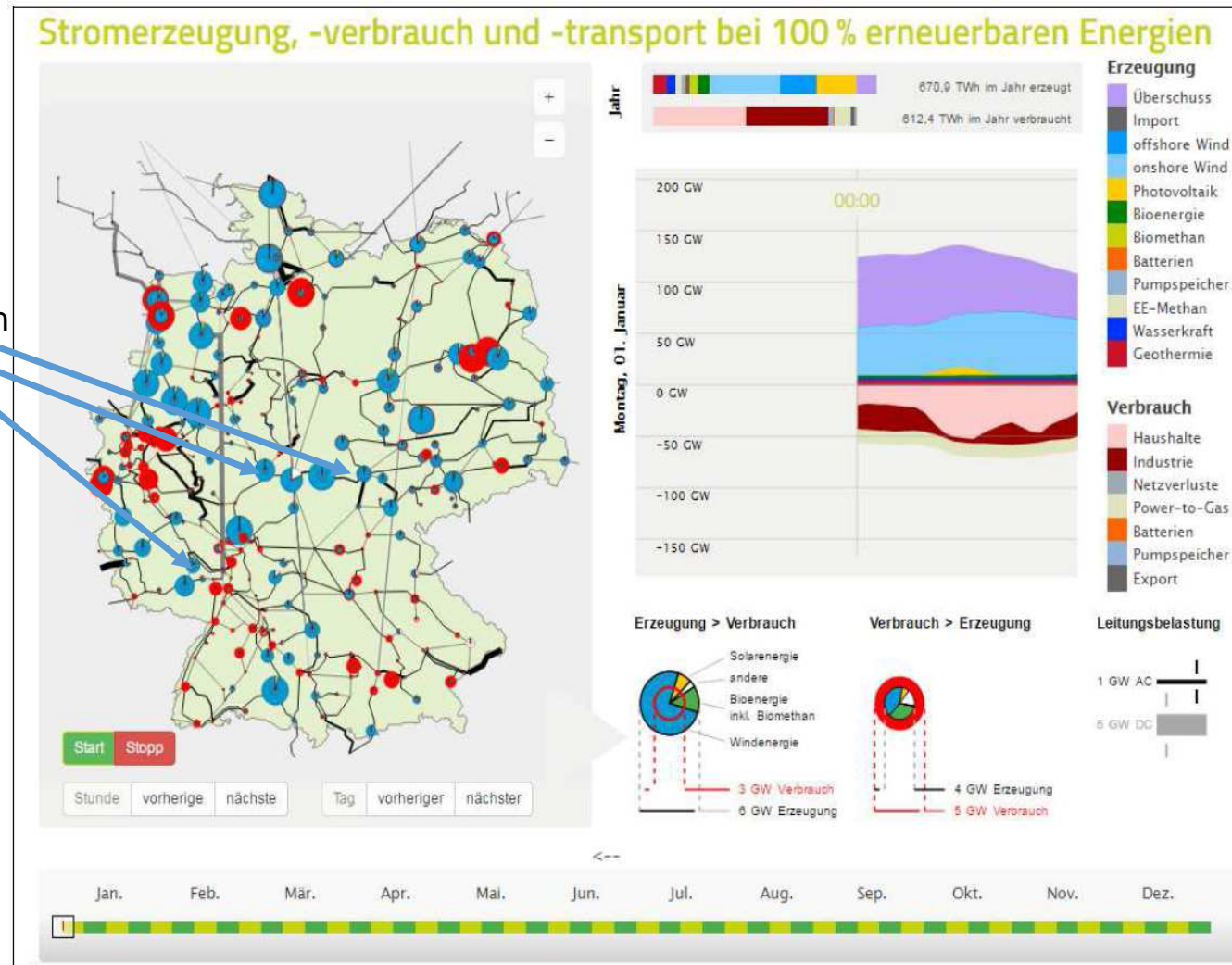
Exemples d'analyse système existantes



- Antares (RTE)
- Continental (EDF)
- Métys (ArtélyS)
- Times Markal (AIE)
- Kombikraftwerk (IWES)

Exemple : EnergieWende/Kombikraftwerk (IWES)

Future Power Transmission Lines



Numérique et traitement de l'information

- Numérique au sens contrôle commande
Off line => Temps réel
- Pour mettre en oeuvre l'optimisation système
- **Software**
 - Apprentissage, construction de modèles
 - Détection d'anomalie
 - Outils de visualisation avancés
- **hardware**
 - Réseaux numériques (dédiés ?)
 - Capteurs
- Gestion de système complexe
- **Cybersécurité**

